

Resiko Otomatisasi Komputer pada Perancangan Struktur

Studi Kasus : Analisis dan Desain Struktur Balok Baja

Wiryanto Dewobroto¹, Wawan Chendrawan²

Abstrak: Produk teknologi berbasis komputer semakin canggih dan terjangkau. Di bidang rekayasa, banyak ditawarkan *structural analysis program* (SAP) dan terbukti sukses dipakai pada perancangan proyek-proyek yang besar dan kompleks. Jadi tidak mengherankan jika SAP menjadi andalan para insinyur. Tersedianya opsi otomatis pada perancangan struktur serta jargon promosinya yang gencar menyebabkan awam atau bahkan insinyur muda beranggapan, bahwa teknologi SAP adalah lebih dari sekedar alat. Proses perancangan struktur, umumnya terdiri dari analisis struktur dan desain penampang. Secara prinsip keduanya berbeda, ditinjau dari tujuan maupun strategi pelaksanaannya. Faktanya jika memakai SAP komersil yang populer, prosesnya mudah, bahkan terlihat seperti satu kesatuan (*seamlessly*). Adanya opsi *default design settings* (CSI 2007) menyebabkan data analisis struktur dapat dipakai langsung pada desain penampang. Sisi lain, pada manual SAP selalu memuat *disclaimer* untuk melakukan *review*, memastikan opsi yang dipilih sesuai. Pada kenyataannya proses *review* tidak mudah, sehingga dipasrahkan saja pada *default design settings*. Perancangan otomatis seperti itu beresiko, hasilnya bisa berlebihan (*overdesign*), bisa juga berbahaya karena tidak cukup (*underdesign*). Untuk itulah akan diteliti kasus-kasus perancangan struktur balok baja memakai SAP yang dianggap populer, yaitu SAP2000 dan ETABS. Penelitian menunjukkan bahwa SAP hanya alat. Kualitas rancangan rekayasa tergantung dari bagaimana insinyur dapat bersinergi dengan alatnya. Akhirnya, semoga penelitian ini dapat digunakan sebagai salah satu rujukan pemakaian SAP.

Kata kunci: analisis, desain; *structural analysis program* (SAP), balok baja.

1. PENDAHULUAN

Produk teknologi berbasis komputer semakin canggih dan terjangkau. Di bidang rekayasa, banyak ditawarkan *structural analysis program* (SAP) dan banyak dipakai secara sukses pada proyek-proyek perancangan konstruksi yang berskala besar dan kompleks. Jadi tidak heran jika SAP menjadi andalan banyak insinyur dalam penyelesaian pekerjaan rekayasa.

Adanya artikel-artikel bagus yang bahkan berkesan promosi (Habibullah and Morris 2009), juga tersedianya opsi otomatis pada proses analisis dan desain menyebabkan banyak yang awam atau bahkan insinyur muda beranggapan bahwa teknologi SAP berbasis komputer adalah **lebih dari sekedar alat**. Bahkan dianggap dapat menggantikan insinyur, jelas ini perlu diwaspadai. Pada perancangan struktur misalnya, ada proses analisis struktur dan desain penampang, yang pada dasarnya adalah dua proses berbeda, baik ditinjau dari sisi tujuan maupun strategi pelaksanaannya. Proses perancangan struktur umumnya dikerjakan secara *trial-and-error* agar optimum. Jadi, tersedianya *structural analysis program* (SAP) komersil yang dapat melakukan keduanya secara sekaligus, tentu sangatlah membantu.

Penggunaan SAP berbeda jika dibandingkan program komputer umum, seperti Photoshop, AutoCAD, atau MS-Word. Program komputer umum hasilnya memang lebih mudah dicerna oleh indera dan langsung dapat digunakan. Sedangkan jika memakai SAP, hasilnya bisa saja menjadi tidak bermakna jika terbukti berbeda dengan fakta di lapangan. Itu mungkin terjadi karena yang diproses SAP hanya model struktur dan bukan struktur sesungguhnya (*real*). Model struktur pada dasarnya hanyalah hasil interpretasi insinyur berdasarkan pengetahuannya tentang perilaku struktur *real* yang ditinjaunya. Oleh karena itu bisa terjadi interpretasinya tidak tepat, sehingga diawal seperti terlihat baik dan benar, tetapi ternyata pada akhirnya menjadi sia-sia karena hasil komputer tidak sesuai dengan perilaku struktur yang terjadi sesungguhnya di lapangan.

¹ Dosen Profesional dan Lektor Kepala, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Tangerang (email : wir@uph.edu)

² Direktur, PT. Gistama Intisemesta Consulting Engineer, Jakarta (email : wawancdw@gmail.com)

Dengan pemikiran seperti itu, maka wajar jika pada manual SAP2000 dan ETABS tersirat bahwa pembuatnya cukup percaya diri menyatakan programnya 'baik', tapi di sisi lain tetap tetap **tidak berani menjamin bahwa tiap orang** dapat memakai dan hasilnya langsung pasti 'baik'. Sebagaimana terbaca pada **Kutipan-1** berikut :

*The design / check of steel frames is **seamlessly integrated** within the program. . . .*

*The programs **are very practical tools for the design / check** of structures.
However the user must thoroughly read the manuals and must clearly recognize the aspects of design that the program algorithms do not address.*

*The user must explicitly understand the assumptions of the programs and **must independently verify** the results.(CSI 2007)*

Kutipan-1 dapat diartikan bila ternyata hasilnya 'tidak baik' maka itu adalah tanggung jawab pemakai (*user*) dan bukan tanggung jawab pembuatnya. Itu juga berarti bahwa insinyurnya selain harus mampu menggunakan SAP secara produktif, juga wajib **memahami karakter program yang akan dipakai**, serta mampu **melakukan verifikasi secara mandiri**. Suatu pernyataan yang mudah untuk dikatakan tetapi tidak mudah untuk dilaksanakan.

Bagaimanapun juga disadari bahwa program SAP komersil, seperti SAP2000 atau ETABS, merupakan produk canggih, yang mengadopsi kemajuan teknologi numerik terkini. Adapun di sisi lain, insinyur pemakai umumnya awam terhadap perkembangan teknologi numerik terkini, dan hanya berbekal pengetahuan yang diperoleh pada level S1. Oleh karena itu, hanya insinyur yang aktif terus menerus belajar, yang dapat memenuhi persyaratan itu.

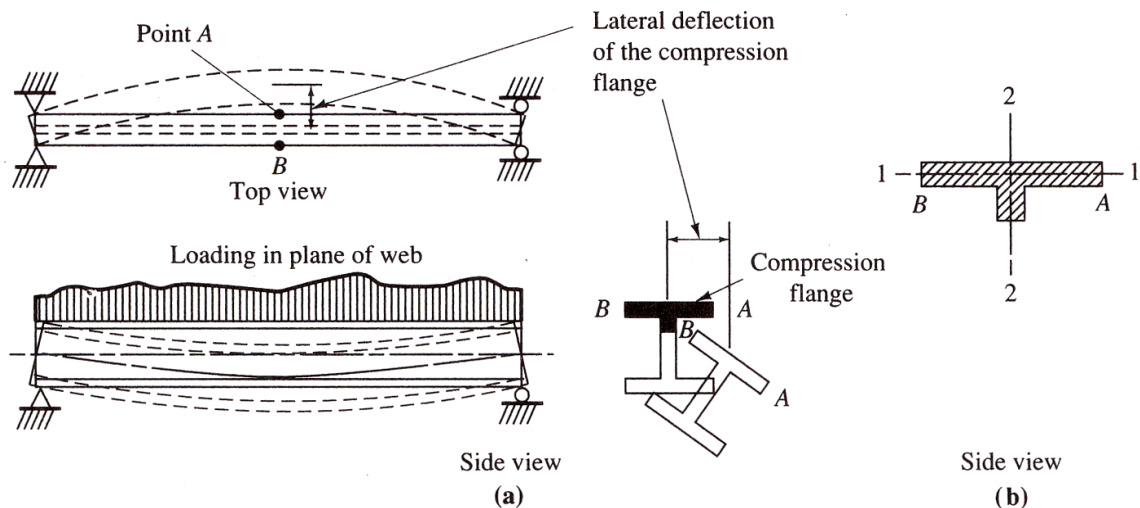
Dewobroto (2010) menunjukkan bahwa perancangan struktur balok baja dengan SAP2000 tidak bisa diserahkan secara penuh pada komputer, pada beberapa kasus masih perlu campur tangan manual insinyur agar hasilnya sesuai harapan. Jadi jika mengandalkan opsi otomatis maka bisa saja pada suatu kasus hasilnya *overdesign* (boros), tetapi pada kasus yang lain *underdesign* (berbahaya). Untuk mengetahui lebih lanjut, kasus tersebut akan dikembangkan dan dievaluasi memakai dua program berbeda SAP2000 dan ETABS.

2. PROSES ANALISIS-DESAIN YANG MENYATU (SEAMLESSLY)

Meskipun disebutkan bahwa proses analisis dan desain seakan-akan menyatu (*seamlessly*) dan terintegrasi (CSI 2007), tetapi pada dasarnya keduanya berbeda, baik ditinjau dari sisi tujuan atau strategi pelaksanaannya. Kalaupun bisa dianggap menyatu maka tentu ada penghubungnya. Jika itu benar maka penghubung yang dimaksud tentu hanya benar pada suatu batasan tertentu. Dari ketentuan desain yang baku (AISC 2005) penghubung yang dimaksud umumnya disusun dari fakta empiris yang diolah berdasarkan kriteria statistik, bahkan ada yang berupa kesepakatan bersama berdasarkan *engineering judgement* saja.

Analisa struktur untuk desain struktur baja biasanya cukup dengan metode elastik-linier (*first order analysis*), kalaupun non-linier masih pada kondisi elastis (*second order analysis*). Adapun pada desain penampang yang menerapkan konsep *limit state design* (LRFD 2005), tahapan evaluasinya mencakup kondisi elastis-linier maupun kondisi in-elastik non-linier sekaligus. Itu diperlukan untuk menjamin hasilnya aman dan dapat dipakai.

Satu hal penting pada proses desain penampang balok baja, tetapi diabaikan pada proses analisis struktur adalah tentang stabilitas. Pada balok baja, stabilitas yang dimaksud adalah *lateral torsional buckling* (LTB), lihat Gambar 1. Untuk itulah dalam perancangan balok baja, sang insinyur harus memastikan adanya pertambahan lateral yang cukup pada bagian profil baja yang mengalami desak, bisa berupa *cross-frame* atau *diaphragm* khusus (Segui 2007). Cara yang lain bisa juga sayap profil balok bajanya disatukan dengan lantai, yaitu jika memakai *steel deck* yang di las ke profilnya. Untuk mengukur efektifitas pertambahan lateral dari sistem tersebut diperlukan *engineering judgement* (McCormac 2008).



Gambar 1. LTB balok dengan pertambatan lateral di tumpuan (Salmon et. al. 2009)

Jika pemodelan struktur tidak memperhitungkan adanya pertambatan lateral (*cross-frame* atau *diaphragm*), maka data desain tentang lokasi pertambatan lateral perlu diberikan. Ini adalah prosedur umum di masa lampau. Pada kenyataannya, sekarang didapati bahwa proses desain dapat berlangsung hanya didasarkan pada data analisis struktur yang diberikan, tanpa ada data tambahan. Itu dimungkinkan karena adanya opsi *Steel Frame Design Preferences* yang selanjutnya disebut *design-preference* (CSI 2007). Opsi tersedia otomatis dan memang membuat SAP2000 atau ETABS lebih *user-friendly* dan praktis, sehingga menjadi salah satu alasan penting mengapa produk tersebut tetap dipilih.

Kutipan-2 dari manual (CSI 2007) menarik untuk dibaca :

*The Steel Frame Design Preferences are basic assignments that apply to all of the steel frame members. . . . Default values are provided for all preference items. Thus, it is **not necessary to specify or change** any of the preferences. However, at least review the default values to ensure they are acceptable.*

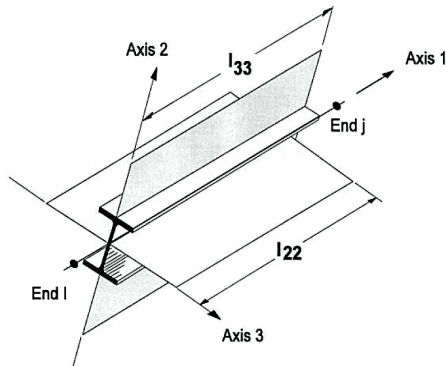
Kutipan-2 meyakinkan kita bahwa *design-preference* yang ada sudah lengkap, tidak perlu dirubah. Padahal kalimat selanjutnya meminta insinyur tetap melakukan review ulang.

Bagaimanapun juga, *design-preference* menawarkan kemudahan dan kepraktisan sehingga insinyur cenderung memakainya untuk setiap kasus. Apalagi jika pemakainya (*user*) masih belum mandiri dan tidak terlalu menguasai segi perancangan struktur secara mendalam.

Pada kenyataannya, proses review tidaklah mudah sehingga dipasrahkan saja pada *default design settings*. Perancangan otomatis seperti itu cukup beresiko, hasilnya bisa berlebihan (*overdesign*), bisa juga berbahaya karena tidak mencukupi (*underdesign*).

3. HIPOTESIS

Pada penulisan kode program komputer agar analisis-desain-nya bersifat *seamlessly*, maka bisa saja terjadi bahwa kode langkah-langkah yang disiapkan *programmer* tidak dapat bekerja dengan baik karena input data yang disiapkan pemakai tidak sesuai. Ketaksesuaian akibat adanya variasi pemodelan struktur yang beragam, bisa juga akibat adanya faktor *engineering judgement* yang bersifat subyektif. Masalah akan timbul jika kekurangan data-data tersebut langsung diambil alih oleh *default design settings* yang menganalisisnya secara otomatis. Kondisi yang mengkhawatirkan tersebut dapat diatasi jika insinyur waspada dan mengetahui potensi-potensi yang dapat menyebabkan kondisi buruk tersebut terjadi.



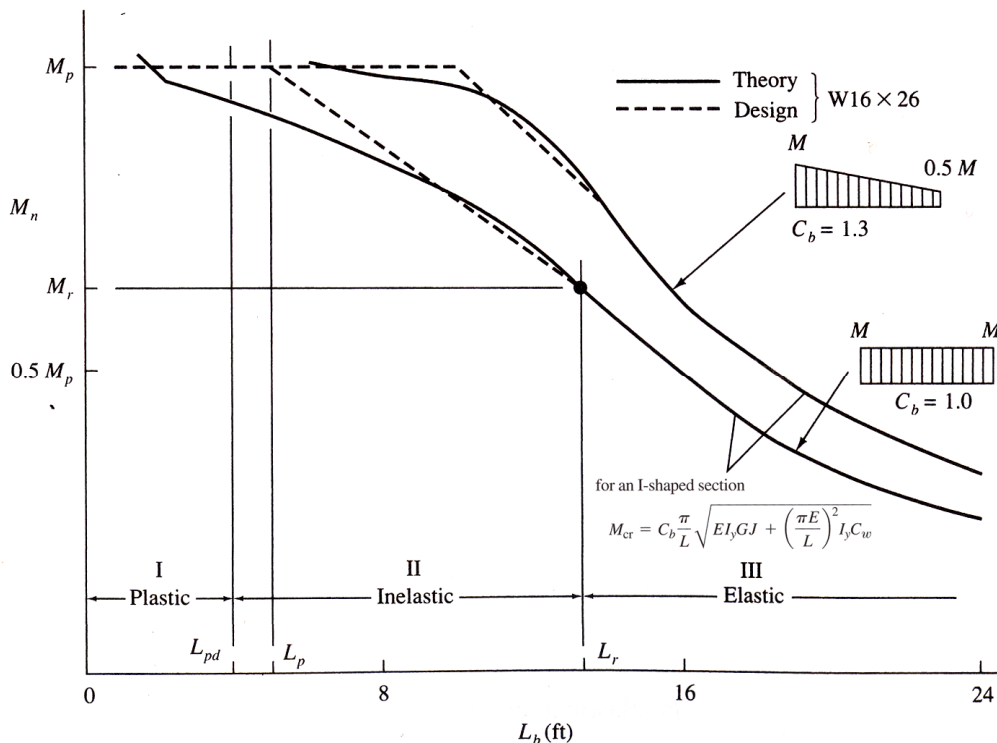
Gambar 2. Jarak Bebas Tidak Tertambat L_b dan kaitannya dengan L_{33} and L_{22} (CSI 2007)

Pada balok baja, parameter yang berkaitan dengan LTB adalah L_b atau jarak bersih tanpa adanya pertambahan lateral. Manual program (CSI 2007) menyatakan (**Kutipan-3**) :

*In determining the values for L_{22} and L_{33} of the members, the program **recognizes various aspects** of the structure that have an effect on these lengths, such as member connectivity, diaphragm constraints and support points. **The program automatically** locates the member support points and **evaluates** the corresponding unsupported length. . . .*

By default, the unsupported length for lateral-torsional buckling, L_b , is taken to be equal to the L_{22} factor.

Kutipan-3 akan ditanggapi lega oleh awam yang beranggapan bahwa program SAP dapat secara otomatis menentukan L_b yang dimaksud, sehingga tidak perlu ada data tambahan. Tetapi bagi insinyur yang paham bahwa parameter L_b dan C_b menentukan kekuatan lentur balok (lihat Gambar 3) tentu mempunyai pertanyaan. Kondisi seperti apa dari model yang menentukan parameter tersebut, dan apakah itu sesuai dengan kemauan pemakainya.



Gambar 3. Pengaruh L_b dan C_b terhadap Kuat Lentur Balok Baja (Salmon et. al. 2009)

Padahal untuk menentukan apakah kondisi pertambahan lateralnya memadai atau tidak, kadang perlu *engineering judgement* (McCormac 2008) yang subyektif. Lagi-lagi manual (CSI 2007) tidak memberi penjelasan detail, meskipun ada sedikit petunjuk (**Kutipan-4**):

*The preferred method is to model a beam, column or brace member as **one single element**. . . . If the member is manually meshed (broken) into segments, maintaining the integrity of the design algorithm becomes difficult.*

Dari kutipan di atas, tersirat bahwa algoritma program juga mempunyai keterbatasan. Ada ketentuan khusus yang harus dipahami dan diikuti, dimulai dari pemodelan struktur untuk analisis sampai desain agar prosesnya dapat berlangsung *seamlessly*.

4. STRATEGI UNTUK EVALUASI KINERJA SOFTWARE PERANCANGAN

Menemukan sesuatu yang akan menjadi potensi masalah (*bug*) pada program komputer, tidaklah mudah. *Bug* yang berkaitan dengan strategi pemakaian, tidak serta-merta ketemu. Itulah alasannya mengapa *developer* program profesional selalu meng-*updated* versi baru.

Untuk solusinya, akan meniru cara mengevaluasi kualitas mutu beton : ambil satu kecil sampel untuk dievaluasi. Tidak menjadi masalah, apakah sampelnya tidak bisa serta merta mewakili kemampuan program secara keseluruhan. Tetapi jika terbukti ada masalah, maka itu akan dijadikan petunjuk berikutnya. Untuk menghindari kesalahan akibat sampel acuan, maka digunakan kasus-kasus yang telah terpublikasi luas, diambil dari Vinnakota (2006), McCormac (2008) maupun Salmon et.al (2009).

5. STUDI KASUS PERANCANGAN OTOMATIS BALOK BAJA (AISC LRFD)

5.1 Umum

Sebagian besar metoda yang digunakan untuk analisis struktur adalah elastis-linier yang dapat dikerjakan jika persyaratan stabilitas dipenuhi. Sedangkan proses desain penampang juga memperhitungkan kondisi elastis-linier maupun inelastis-nonlinier, termasuk masalah stabilitas juga, yang mana untuk menentukan data-datanya yang tepat perlu pertimbangan berdasarkan *engineering judgement* (McCormac 2008), yang bersifat subyektif.

Dengan melihat bagaimana program SAP2000 dan ETABS menyelesaikan kasus yang ditinjau, maka subyektifitas pemrogramnya dapat dipelajari.

5.2 Balok dengan pertambahan lateral penuh (Mc Cormac 2008 hal. 269)

Kasus 1 diambil dari **Example 9-2** (Mc Cormac 2008 p.269) : balok profil baja W24 x 62, mutu $F_y = 50$ ksi, kondisi terkekang sempurna ($L_b = 0$), beban mati merata tambahan $w_D = 1.5$ k/ft, berat sendiri dihitung, beban hidup terpusat $P_L = 30$ kips di B, penyelesaian memakai cara LRFD dari AISC 360-05 / IBC 2006 (AISC 2005).

Dari *Load Factor Design Selection Table* untuk profil W24 x 62 $F_y = 50$ ksi diperoleh

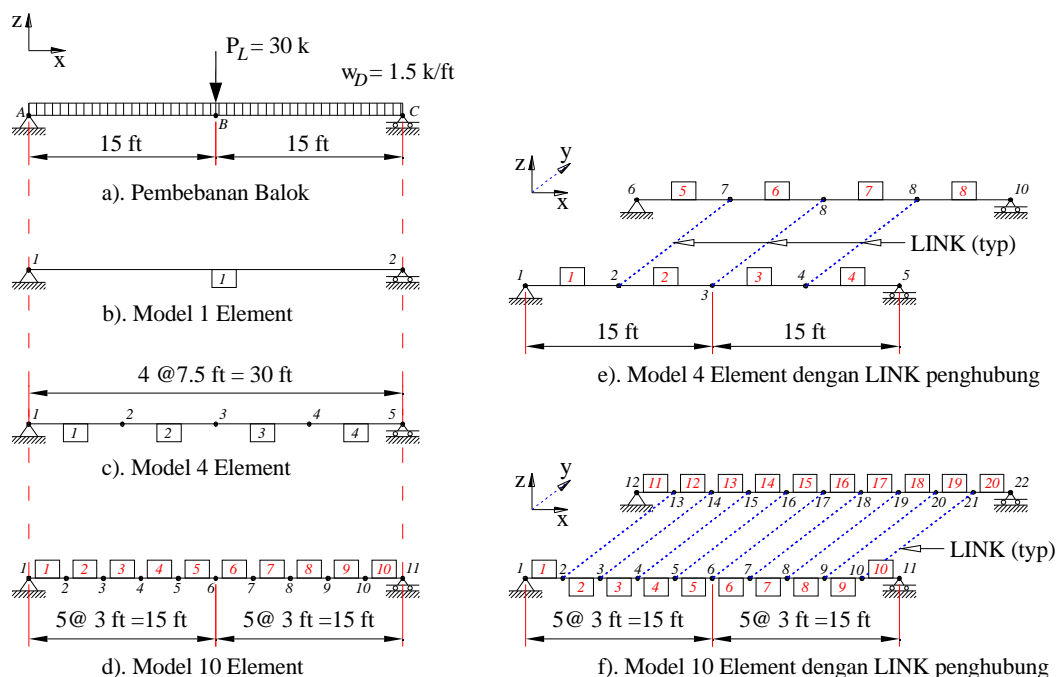
$$\phi_b M_p = 574 \text{ kip-ft} ; \phi_b M_r = 393 \text{ kip-ft} ; L_p = 4.9 \text{ ft} ; L_r = 13.3 \text{ ft}$$

Ditinjau 5 (lima) model struktur balok dengan perincian sebagai berikut :

1. Model 1 element : panjang segmen $L = 30 \text{ ft} > L_r = 13.3 \text{ ft}$ (elastis)
2. Model 4 element : panjang segmen $L_p = 4.9 \text{ ft} < L = 7.5 \text{ ft} < L_r = 13.3 \text{ ft}$ (inelastis)
3. Model 10 element : panjang segmen $L = 3.0 \text{ ft} < L_p = 4.9 \text{ ft}$ (plastis)
4. Model 4 element dengan link penghubung. Model ini pada dasarnya adalah menempatkan dua model 4 element yang disejajarkan dan dihubungkan dengan LINK.
5. Model 10 element dengan link penghubung. Model ini pada dasarnya adalah menempatkan dua model 10 element yang disejajarkan dan dihubungkan dengan LINK.

LINK adalah element yang menghubungkan secara aksial ke dua balok pada arah samping (lihat Gambar 4e / 4f), lokasinya ditempat yang umum ada *cross-frame* atau *diaphragma*. Agar hanya terhubung secara aksial, maka element diberi kekakuan aksial saja sehingga pada properti penampang ditetapkan $A_{link} = 1$, sedang properti yang lain nol.

Dengan asumsi di atas, maka tentunya balok tetap saja terpuntir bila terjadi instabilitas. Jadi jika ditinjau keseluruhan berdasarkan *engineering judgement* mestinya penempatan LINK tersebut tidak berpengaruh pada pertambahan lateral. Apalagi penempatannya tidak pada sayap desak tetapi pada sumbu as balok. Jadi element LINK yang dipasang sebenarnya hanya *dummy* (tidak ada gunanya). Ternyata komputer menganggapnya lain, element LINK tidak dianggap *dummy*, sehingga hasil desain komputer sama seperti acuan desain.



Gambar 4. Balok Kasus-1 dan model-model penyelesaiannya (Dewobroto 2010)

Model balok di atas di desain ulang memakai opsi otomatis program SAP2000 dan ETABS. Hasilnya disajikan dalam Tabel 1 berikut.

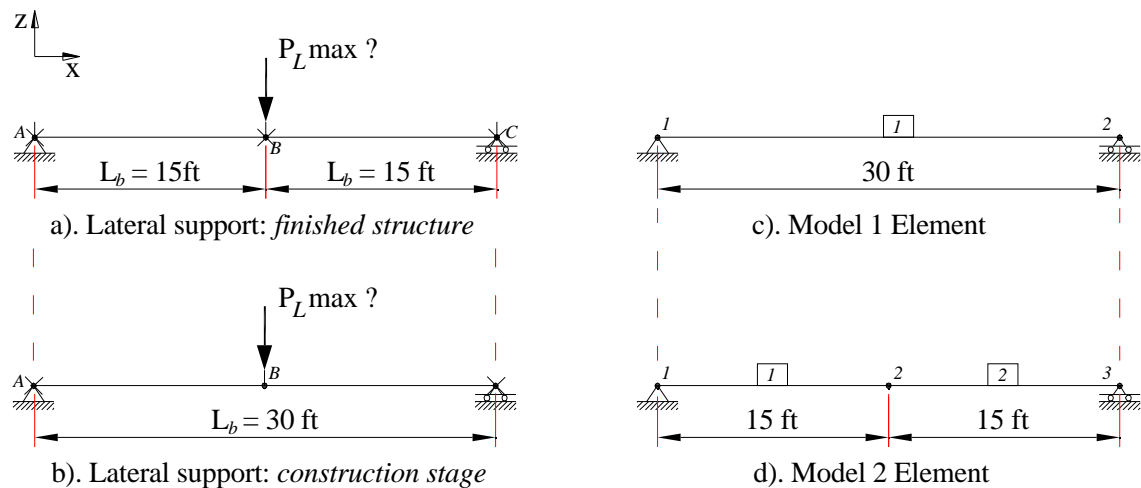
Tabel 1. Desain Otomatis Balok W24 x 62 dengan Pertambahan Lateral Penuh

No	Materi Desain	M_u	C_b	L_{factor}	ϕM_n	R	%	Keterangan
		kips-ft			kips-ft			
1	Manual (McCormac 2008)	570.80	-	-	574.00	0.994	100%	Acuan desain
2	Model 1 element	570.86	1.24	1	139.28	4.099	412%	SAP2000 ver 11
		570.84	1.24	1	139.19	4.101	410%	ETABS ver 9.2
3	Model 4 element	570.86	1.00	4	112.02	5.096	512%	SAP2000 ver 11
		570.84	1.17	4	573.75	0.995	100%	ETABS ver 9.2
4	Model 10 element	570.86	1.00	10	112.02	5.096	512%	SAP2000 ver 11
		570.84	1.06	10	573.75	0.995	100%	ETABS ver 9.2
5	Model 4 element + Link	570.86	1.17	4	573.75	0.995	100%	SAP2000 ver 11
		570.84	1.17	4	573.75	0.995	100%	ETABS ver 9.2
6	Model 10 element + Link	570.86	1.06	10	573.75	0.995	100%	SAP2000 ver 11
		570.84	1.06	10	573.75	0.995	100%	ETABS ver 9.2

Catatan : R adalah ratio dari $M_u : \phi M_n$

5.2 Balok dengan pertambatan lateral terbatas (Vinnakota 2006 hal. 566)

Hasil Kasus-1 seakan-akan menunjukkan program ETABS lebih baik dibanding SAP2000. Oleh karena itu perlu ditinjau Kasus-2 dari **Example 10.4.4** (Vinnakota 2006) yaitu dalam mengestimasi beban terpusat maksimum ditengah balok dengan profil W24 x 76, mutu A588 $F_y = 50$ ksi, dengan pertambatan lateral hanya di tumpuan, berat sendiri diabaikan. Solusi desain memakai cara LRFD dari AISC 360-05 / IBC 2006 (AISC 2005).



Gambar 5. Balok Kasus-2 dan model-model penyelesaiannya

Dengan cara sama seperti yang dilakukan pada Kasus-1, yaitu desain otomatis memakai opsi *design preference* dan selanjutnya hasilnya disajikan dalam Tabel 2 berikut :

Tabel 2. Desain Otomatis Balok W24x76 dengan Pertambatan Lateral Terbatas

No	Object	P_L	M_u	C_b	L_{factor}	ϕM_n	R	%	Keterangan
		kips	kips-ft			kips-ft			
1	Finished structure	62.5	750	1.67	-	750	1.00	100%	Acuan desain (Vinnakota 2006)
	Construction stage	26.0	312	1.32	-	312	1.00	100%	
2	Model 1 element	62.5	750	1.32	1	306	2.45	245%	SAP2000 ver 11 AISC-LRFD-99
		26.0	312	1.32	1	306	1.02	102%	
3	Model 1 element	62.5	750	1.32	1	306	2.45	245%	SAP2000 ver 11 AISC-360-05
		26.0	312	1.32	1	306	1.02	102%	
4	Model 1 element	62.5	750	1.32	1	311	2.41	241%	ETABS ver 9.2 AISC-LRFD-99
		26.0	312	1.32	1	311	1.00	100%	
5	Model 1 element	62.5	750	1.32	1	311	5.82	582%	ETABS ver 9.2 AISC-360-05
		26.0	312	1.32	1	311	1.00	100%	
6	Model 2 element	62.5	750	1.00	2	233	3.22	322%	SAP2000 ver 11 AISC-360-05
		26.0	312	1.00	2	233	1.34	134%	
7	Model 2 element	62.5	750	1.67	2	750	1.00	100%	ETABS ver 9.2 AISC-LRFD-99
		26.0	312	1.67	2	750	0.42	42%	
8	Model 2 element	62.5	750	1.67	1	750	1.00	100%	ETABS ver 9.2 AISC-360-05
		26.0	312	1.67	1	750	0.42	42%	

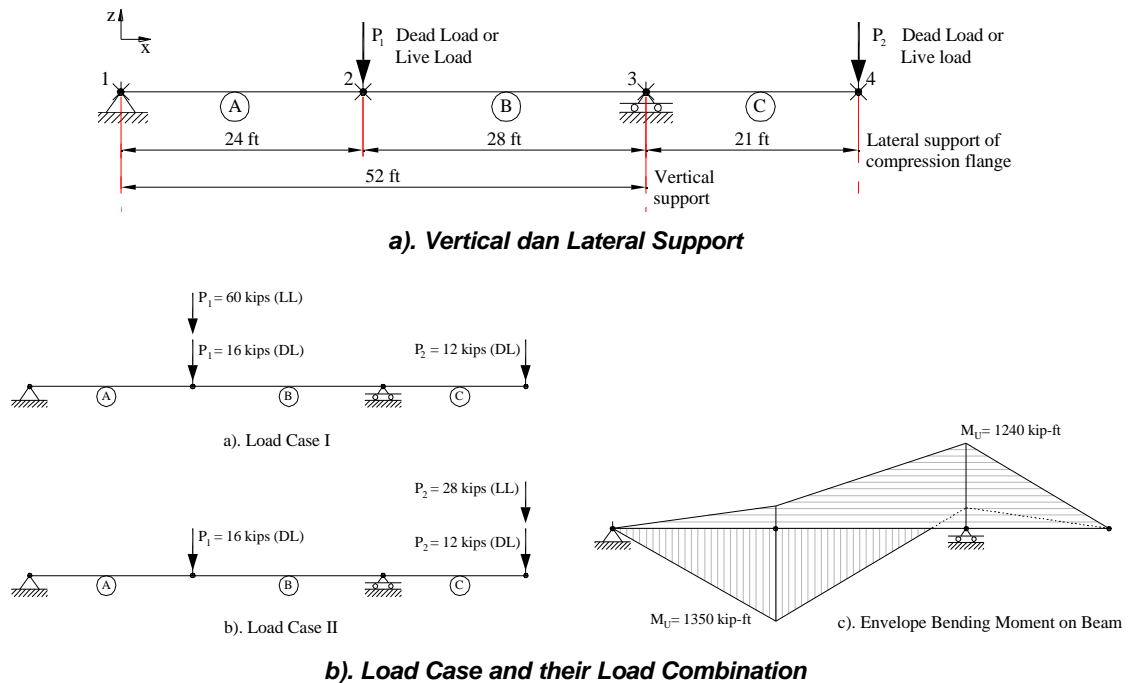
Catatan :

§ nilai C_b berbeda pada kondisi pertambatan lateral yang berbeda.

§ R adalah ratio dari $M_u : \phi M_n$

5.3 Balok dan kantilever pertambahan lateral terbatas (Salmon et.al 2009)

Kasus-2 dari **Example 9.9.3** (Salmon et.al 2009 p.455) : profil W33 x 118, mutu $F_y = 50$ ksi, kekangan lateral pada titik tumpuan dan beban, berat sendiri diabaikan. Desain cara LRFD AISC 2005. Dari *Load Factor Design* profil W33 x 118 $F_y = 50$ ksi diperoleh $\phi_b = 0.9$ $Z_x = 415$ in³ $M_p = 1730$ kip-ft $\phi_b M_p = 1560$ kip-ft ; $\phi_b M_r = 1080$ kip-ft ; $L_p = 8.2$ ft ; $L_r = 23.5$ ft



Gambar 6. Balok Kasus-3

Akibat tahanan lateral segment A, B dan C berbeda, maka diperlukan evaluasi tersendiri.

Tabel 3. Desain Otomatis Balok W33 x 118 dengan Kantilever

No	Materi Design	M_u kips-ft	C_b	L_b ft	L_{factor}	ϕM_n kips-ft	R	%	Keterangan
1	Acuan desain segment A	1350	1.67	24	-	1510	0.894	100%	Salmon et. al 2009
	Acuan desain segment B	1350	2.00	28	-	1390	0.971	100%	
	Acuan desain segment C	1240	1.00	21	-	1027	1.207	100%	
2	SAP ¹ : 3 Element (1-2)	1349	1.00	-	2.167	271	4.988	558%	Segment A
	SAP ¹ : 3 Element (2-3)	1349	1.00	-	1.857	271	4.988	515%	Segment B – kiri
	SAP ¹ : 3 Element (2-3)	1243	1.00	-	1.857	271	4.596	-	Segment B – kanan
	SAP ¹ : 3 Element (3-4)	1243	1.67	-	1.000	1556	0.799	66%	Segment C
3	SAP ² : 3 Element (1-2)	1349	1.67	-	2.167	1508	0.895	100%	Segment A
	SAP ² : 3 Element (2-3)	1349	1.96	-	1.857	1363	0.990	102%	Segment B – kiri
	SAP ¹ : 3 Element (2-3)	1243	1.42	-	1.857	987	1.260	-	Segment B – kanan
	SAP ² : 3 Element (3-4)	1243	1.67	-	1.000	1556	0.799	66%	Segment C
4	ETABS : 3 Element (1-2)	1349	1.67	-	1.000	1510	0.867	97%	Segment A
	ETABS : 3 Element (2-3)	1349	1.96	-	1.000	1364	0.978	101%	Segment B – kiri
	ETABS : 3 Element (2-3)	1243	1.42	-	1.000	988	1.584	-	Segment B – kanan Eq. (H1.3b, H1-2)
	ETABS : 3 Element (3-4)	1243	1.67	-	1.000	1556	0.799	66%	Segment C

Keterangan opsi program yang diaktifkan:

¹ Analysis Option : Space Frame

² Analysis Option : Space Frame, D.O.F titik 2 dan 4 pada arah sb.2 di restraint

6. PEMBAHASAN KASUS-KASUS PERANCANGAN YANG DITINJAU

6.1 Umum

Tiga kasus perancangan balok baja, dari tiga sumber berbeda telah dianalisis dan didesain ulang dengan SAP2000 dan ETABS. Pada tahap analisis ke duanya memberi hasil yang relatif sama, tetapi pada tahap desain yang dilakukan secara otomatis, ternyata beberapa hasilnya tidak memuaskan, yaitu berbeda dengan hasil desain acuan. Itu adalah petunjuk bahwa fasilitas opsi otomatis program mempunyai keterbatasan dalam memproses data-data suatu pemodelan struktur, yang variasinya relatif cukup banyak, bahkan tidak terbatas.

Jadi meskipun pembuatnya sama, bahkan buku manual keduanya juga merujuk pada judul yang sama (CSI 2007), tetapi kode program yang mengendalikan opsi otomatisasi, yaitu memproses data analisis untuk diolah menjadi data desain, berbeda satu dengan lainnya. Perbedaan tersebut menghasilkan **karakter program** yang berbeda pula.

Agar hasil desain dengan opsi otomatis optimal dan sesuai harapan, maka insinyur perlu menyiapkan model struktur yang sesuai dengan karakter program yang dipakai. Adanya buku manual yang sama, tetapi karakter programnya berbeda adalah petunjuk bahwa untuk mengenal karakter suatu program tidak cukup hanya membaca buku manualnya saja, tetapi perlu pengalaman langsung dengan program itu sendiri.

6.2 Karakter Program SAP2000 dan ETABS

SAP2000 dan ETABS adalah *structural analysis program* (SAP) komersil dari Computer and Structure Inc., Berkeley, (www.csiberkeley.com), yang dibuat untuk mengisi pasar yang berbeda. SAP2000 adalah *general purpose* SAP, sedangkan ETABS lebih ditujukan pada perancangan bangunan gedung (2D atau 3D). Jadi wajar saja jika kedua program tersebut mempunyai karakter program berbeda. Itu sebabnya, mengapa CSI menjual keduanya secara terpisah dan bukan dengan cara menggabungkannya. Pada penelitian ini, terbukti bahwa karakter program tidak mempengaruhi proses analisis, tetapi hanya hasil desain.

Dari manual ETABS (CSI 2005), maka dapat diketahui bahwa rangka (element Frame) yang diorientasikan horizontal disebut **beam**, yang diorientasikan vertikal disebut **column**, sedangkan yang diagonal sebagai **brace**. Penggolongan tersebut sangat berguna karena mengikuti karakter 3D konstruksi bangunan gedung, yang memang tertentu geometrinya. Kondisi tersebut memudahkan pemrogram mengolah data analisis untuk data desain.

Cara yang sama seperti ETABS jelas tidak bisa diterapkan pada program SAP2000 yang memang ditujukan untuk struktur umum (*general purpose*), yang tidak terbatas hanya untuk konstruksi gedung tinggi, tetapi juga struktur-struktur lain seperti jembatan, atap, dsb-nya. Meskipun orientasi element rangka SAP2000 juga dibedakan, yaitu orientasi vertikal dan non-vertikal, tetapi itu hanya terbatas pada kesepakatan tanda saja (Dewobroto 2007).

Tidak adanya penggolongan element menjadi *beam*, *column* atau *brace* pada SAP2000 memang tidak mengganggu proses analisisnya, tetapi proses desainnya jelas lebih rumit karena persyaratan desain balok atau kolom atau bracing adalah berbeda. Jadi meskipun secara prinsip, proses desain kedua program adalah sama, tetapi karena adanya hal-hal tersebut menyebabkan strategi pemrogram untuk membuat proses analisis-desain menyatu (*seamlessly*) secara otomatis pada kedua program akan berbeda. Itu pula alasan, mengapa hasil program SAP2000 dan ETABS berbeda dalam proses desain otomatis.

Element balok pada konstruksi bangunan gedung tinggi umumnya untuk mendukung lantai bangunan yang umumnya berupa lantai beton bertulang. Jarang ada balok lantai berupa grid terbuka yang berdiri sendiri. Adanya lantai yang menjadi satu kesatuan dengan balok menyebabkan pertambahan lateral balok relatif lebih terjamin. Oleh karena itulah ETABS selalu menganggap pada tiap ujung segmen balok mendapat pertambahan lateral cukup.

Itu dapat dilihat pada Kasus-1, semua model balok yang dibagi menjadi beberapa segmen menunjukkan hasil sesuai (bernilai $\pm 100\%$). Sedangkan SAP2000, meskipun model balok telah dibagi menjadi beberapa segmen (4 dan 10 element) tetapi hasilnya menunjukkan bahwa kondisi balok adalah bebas, tanpa pertambahan lateral. Agar menjadi tertambat maka perlu tambahan elemen lain (LINK) yang seakan-akan berfungsi sebagai bracing.

Jika Kasus-1 cukup sesuai jika digunakan program ETABS, maka program yang sama akan memberi hasil yang mengecoh (bisa berbahaya) jika digunakan untuk perancangan balok pada Kasus-2, khususnya yang pertambahan lateral pada baloknya tidak terjamin.

6.3 Pengaruh pemodelan struktur pada proses desain penampang

Untuk mencari kondisi pertambahan lateral struktur pada proses desain, program SAP2000 akan menghitung secara lengkap konfigurasi geometri strukturnya (CSI 2007), oleh karena itu suatu pemodelan struktur 3D pada program SAP2000 cenderung memberi hasil desain otomatis yang lebih baik dibandingkan jika dimodelkan lebih sederhana sebagai model 2D. Sebagai contoh dapat dilihat kasus pemodelan balok dengan tambahan elemen LINK pada Kasus-1 yang memberi hasil mendekati hasil desain acuan.

Model 3D yang lebih rumit jelas bertentangan dengan prinsip pemodelan pada umumnya yang cenderung memilih model yang sederhana dibanding model yang rumit. Semakin banyak data yang dilibatkan maka semakin banyak hasil yang perlu diinterpretasikan oleh insinyur, dan itu merupakan sumber-sumber untuk terjadinya *human-error*.

Sedangkan pemodelan dengan ETABS, karena setiap elemen rangkanya telah digolongkan terlebih dahulu menjadi *beam* atau *column* atau *brace*, maka tentunya proses analisis dan desain dapat berlangsung secara lebih baik. Studi kasus pada balok menunjukkan bahwa memakai pemodelan 2D saja dapat dihasilkan rancangan yang baik memakai ETABS.

6.4 Faktor-faktor yang menentukan pada desain penampang

Problem yang ditinjau relatif sederhana, yaitu perancangan balok baja menurut AISC LRFD. Oleh sebab itu dapat diketahui bahwa parameter desain yang belum diberikan pada proses analisis adalah parameter L_b dan C_b . Masing-masing adalah jarak bebas tanpa pertambahan lateral (l_{22} pada Gambar 2) dan faktor momen gradien. Pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kekuatan lentur balok diperlihatkan pada kurva di Gambar 3. Sedangkan penjelasannya secara lengkap dapat dibaca pada buku teks baja standar (Vinnakota 2006, McCormac 2008 dan Salmon 2009). Mempelajari studi kasus, khusus pada parameter tadi maka disimpulkan bahwa penyebab perbedaan hasil SAP2000 dan ETABS terhadap hasil desain acuan adalah bersumber dari **bagaimana program tersebut memproses input-data tahap analisis untuk menghasilkan L_b dan C_b yang merupakan input-data yang kurang pada tahap desain.**

Penentuan parameter C_b relatif mudah karena rumus F1-1 (AISC LRFD 05) cukup jelas pemakaiannya. Kesalahan dijumpai karena ada ketentuan dari AISC bahwa untuk struktur kantilever nilai $C_b = 1$ (rumus F1-1 tidak digunakan). Jadi dari hasil desain pada Kasus-3 (lihat Tabel 3) terlihat bahwa nilai C_b pada element 3-4 tidak sama dengan satu, baik program SAP2000 maupun ETABS. Jadi keduanya belum bisa mengidentifikasi secara otomatis apakah strukturnya merupakan balok biasa atau kantilever. Dengan demikian para insinyur memakai program **harus mengaktifkan secara manual** dengan opsi **Overwrites**. Jika tidak diubah secara manual maka hasilnya menjadi *under-design* atau tidak aman.

Penentuan parameter L_b oleh SAP2000 dan ETABS cukup berbeda. Perbedaan tersebut timbul karena kedua program menasar target perencanaan yang berbeda sebagaimana telah dijelaskan pada karakter program pada bab 6.2 sebelumnya.

7. KETERBATASAN PERANCANGAN OTOMATIS BALOK BAJA

Adanya perbedaan hasil antara desain otomatis komputer dengan desain manual rujukan, tidak serta merta bisa dijadikan kesimpulan bahwa program komputernya ada yang salah. Bagaimanapun juga untuk membuat suatu pernyataan yang umum sifatnya, tidak mudah. Untuk itu diperlukan banyak sampel dan bahkan jika perlu diolah secara statistik. Selain itu, kalau melihat hasil desain otomatis komputer tidak semuanya jelek. Ada beberapa hasil lain yang cukup memuaskan. Jadi bisa dikatakan bahwa perbedaan timbul akibat keterbatasan program yang terlampaui, data yang disiapkan tidak sesuai dengan karakter programnya.

Meskipun pada buku manual telah secara implisit dijelaskan karakter programnya, tetapi tidak semua pembaca memahaminya secara jelas. Berdasarkan kasus-kasus yang diteliti selanjutnya dapat diungkapkan beberapa petunjuk tentang keterbatasan desain otomatis dengan SAP2000 atau ETABS, sehingga diharapkan tidak dijumpai lagi kesalahan sejenis.

Adapun keterbatasan yang dapat diungkapkan adalah :

1. SAP2000 dan ETABS dapat saja secara otomatis mengevaluasi kondisi *lateral torsional buckling* (LTB) balok, dengan menentukan nilai L_b . Tetapi cara keduanya mengevaluasi sangat berbeda, oleh karena itu para insinyur pemakai harus memahaminya.
2. Khusus untuk konstruksi balok kantilever, nilai C_b yang dihitung oleh kedua program belum sesuai dengan AISC LRFD dan perlu *overwrite* secara manual. Jika tidak, maka hasilnya *under-design*, sehingga pada suatu kasus tertentu bisa membahayakan.
3. ETABS sesuai untuk sistem balok yang tertambat penuh secara lateral seperti lantai beton bertulang pada bangunan gedung. Sedangkan SAP2000 cocok digunakan untuk perancangan struktur dengan sistem rangka terbuka, dimana sistem pertambatan lateral perlu dimasukkan juga dalam pemodelannya secara eksplisit.
4. Agar perancangan struktur baja optimal, perlu pemodelan struktur yang disesuaikan dengan karakter program. Jika hanya mempertimbangkan data untuk keperluan analisis strukturnya saja, maka jelas data tersebut tidak mencukupi. Perlu informasi tambahan khususnya kondisi *restraint* pada titik-titik yang dianggap ada pertambatan lateralnya. Ini merupakan sesuatu keharusan, khususnya untuk struktur yang dimodelkan secara terbatas, seperti pemodelan 2D (*plane frame*). Jika struktur dapat dimodelkan secara 3D (*space-frame*) lengkap, maka ada kemungkinan SAP2000 dapat menghitung secara otomatis, meskipun kebenaran L_b -nya perlu dievaluasi ulang oleh insinyurnya.
5. Pada balok dengan pertambatan lateralnya yang baik, seperti lantai komposit, maka jika digunakan SAP2000 untuk perancangan otomatis, maka perlu campur tangan insinyur untuk mengevaluasi nilai L_b yang dihitung komputer, dan jika diperlukan mengubahnya dengan opsi *overwrite* yang telah disediakan.
6. Ada ketidaksamaan persepsi antara pemodelan bagian yang mempunyai tambatan lateral, dengan kondisi real. Ada pemahaman bahwa profil desak disebut tertambat secara lateral jika dipasang *bracing* sedemikian sehingga profil tersebut tidak mengalami perputaran pada sumbunya. Dalam pemodelan kondisi tersebut seharusnya di *restraint* pada D.O.F rotasi, dan bukan D.O.F translasi. Dalam kenyataannya, seperti dijumpai pada pemodelan Kasus-1 ternyata dapat diatasi dengan hanya memasang LINK arah sumbu-3 yang tersambungkan secara aksial (pin). Pada Kasus-2, sebagai pengganti LINK ditetapkan kondisi *restraint* translasi pada arah sumbu-3, yaitu δ_y (mengikuti tata aturan sumbu 3D pada program SAP2000). Kondisi tersebut tentu tidak selaras dengan kriteria pertambatan lateral seperti yang telah dikemukakan di atas. Jadi bisa saja dikatakan, bahwa apa yang dianggap tertambat lateral oleh program, ternyata tidak dipahami sama secara realitas, demikian pula sebaliknya.

8. SIAPA YANG BENAR ATAU SIAPA YANG SALAH

Adanya temuan yang tidak memuaskan dalam pemakaian SAP, apakah itu SAP2000 atau ETABS tentu menimbulkan pertanyaan, siapa yang jadi sumber masalah: [1] Program SAP-nya yang tidak *reliable*, atau [2] insinyur pemakainya yang tidak kompeten.

Jawabannya tergantung dari bagaimana sikap pemakai terhadap program tersebut.

Jika dianggap bahwa SAP adalah hasil teknologi buatan manusia yang sangat hebat, yang dapat menyelesaikan semua masalah secara otomatis. Sehingga pemakai tidak perlu tahu hal-hal apa yang dikerjakan program, maka ketika kemudian ditemukan fakta ketidaksempurnaan, orang tersebut cenderung akan menyalahkan program komputer tersebut.

Sedangkan yang lain, yang menganggap bahwa SAP adalah seperti hasil teknologi lainnya, yaitu jika dapat memakai secara tepat tentu akan sangat berguna. Sedangkan jika teknologi tersebut tidak bisa dipakai dengan baik maka cenderung tidak bermanfaat dan bahkan bisa menghasilkan bahaya bagi pemakainya. Orang yang berpendapat seperti ini tentu tidak perlu bersusah-payah mengajukan pertanyaan di atas, karena sudah tahu jawabannya.

Adanya pembahasan di atas menunjukkan bahwa jika dapat dipahami keterbatasan suatu program, maka dengan memberi masukan atau perubahan pada *design-preference* dengan opsi *overwrite* yang memang telah disediakan, maka akhirnya SAP2000 dan ETABS dapat menampilkan hasil yang memuaskan.

9. KESIMPULAN

Program SAP2000 dan ETABS buatan CSI (www.csiberkeley.com) merupakan salah satu *structural analysis program* komersial yang mampu melakukan perancangan **struktur balok baja** secara mudah dan terintegrasi (*seamlessly*). Tetapi untuk mendapatkan hasil yang diharapkan, maka insinyur perlu mempersiapkan pemodelan struktur yang sesuai dengan karakter program, yang ternyata berbeda antara SAP2000 dan ETABS.

Selanjutnya yang penting diperhatikan adalah memeriksa parameter desain (L_b , C_b) yang dihasilkan program, yang masing-masing adalah jarak bebas tanpa pertambahan lateral dan faktor momen gradien. Keduanya perlu direview, apakah sudah sesuai dengan asumsinya.

Ini merupakan fakta yang membuktikan bahwa program komputer yang dianggap canggih sekalipun ternyata hanya berguna sebagai alat atau *tool* saja. Hasil akhir suatu rancangan rekayasa yang berbasis komputer tetap terletak pada manusia pemakainya (insinyur).

No computer program can replace the engineering judgment of an experienced engineer.

It is well said that an incapable engineer cannot do with a ton of computer output what a good engineer can do on the back of an envelope.

Kutipan di atas adalah **The “SAP” Warning**, yang terdapat pada manual program SAP80, versi awal *structural analysis program* pada komputer pribadi (Wilson and Habibullah 1986). Pesan Prof. Wilson tersebut telah ada lebih dari ¼ abad yang lalu dan ternyata masih *valid* sampai sekarang bagi para insinyur untuk dijadikan acuan bagi kesuksesan karirnya.

DAFTAR PUSTAKA

AISC. (2005). “ANSI/AISC 360-05: An American National Standard – Specification for Structural Steel Building”, American Institute of Steel Construction, One East Wacker Drive, Suite 700, Chicago, Illinois

- CSI. (2005). "*ETABS Integrated Building Design Software : Welcome to ETABS*", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA
- CSI. (2007). "*Steel Frame Design Manual AISC 360-05/IBC2006 - For SAP2000 and ETABS*", Computer and Structure, Inc., Berkeley, California
- Dewobroto, W. (2007). "*Aplikasi Rekayasa Konstruksi dengan SAP2000 – Edisi Baru*", Elex Media Komputindo, Jakarta
- Dewobroto, W. (2010). "*Dampak Pemakaian 'Design Preference' pada Rancangan Struktur - Studi Kasus : Analisis dan Design Balok Baja memakai SAP2000 versi 11.0*", Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS) 4, Unud-UAJY-UPH, Wisma Wisata Werdhapura, Sanur, Bali, 2-3 Juni 2010.
- Habibullah, A., and G. Robert Morris. (2009). "*Advanced Nonlinear Analysis For Modern Structures*", Seminar dan Pameran HAKI 2009 - "*Advanced Nonlinear Analysis for Modern Structures*", Hotel Borobudur, Jakarta
- McCormac, J. (2008). "*Structural Steel Design 4th Ed.*", Pearson International Edition, USA.
- Salmon, C.G., J.E. Johnson and F.A. Malhas. (2009). "*Steel Structures: Design and Behavior - Emphazing Load and Resistance Factor Design, 5th Ed.*", Pearson International Edition.
- Segui, W.T.(2007). "*Steel Design 4th Ed.*", Cengage Learning
- Vinnakota, S. (2006). "*Steel Structures : Behavior and LRFD*", McGraw-Hill Int. Edition
- Wilson, E., and Habibullah, A. (1986). "*SAP80 Structural Analysis Programs - A Series of Computer Programs for the Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures: Technical Reference Manual*", Computers & Structures Inc., Berkeley, California